

林尧林, 刘乃维. 建筑热环境 Zonal Model 研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(5): 117–124. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.250516

建筑热环境 Zonal Model 研究

林尧林, 刘乃维

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: Zonal Model 作为介于节点模型和计算流体动力学(CFD)之间的一种中间方法,能够粗略快速地估计建筑内的气流和温度分布。并且随着模型的不断发展,衍生出了各种修正缺陷后的 Zonal Model,提高模型稳定可靠性的同时,又提高了模型的运算效率和精度。本文按照维度以及稳态/瞬态较为全面地综述了自模型提出以来各种 Zonal Model 的演变、特征及应用。此外,Zonal Model 在不断的改进中与其他模型,例如能耗模型、污染物模型等的耦合上有了更稳定的发展应用,在反计算上也有广阔的应用前景,因此应该进一步促进这一方面的应用。

关键词: Zonal Model; 建筑热环境; 应用; 演变

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)05-0117-08

A review of Zonal Model of building thermal environment

LIN Yaolin, LIU Naiwei

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: As an intermediate method between nodal model and Computational Fluid Dynamics (CFD), the Zonal Model can be used to quickly obtain the airflow and temperature distribution field in the building with satisfactory accuracy. With continuous development, various defects have been corrected with new generation of Zonal Models, which not only improves the stability and reliability of the model, but also improves its calculation efficiency and accuracy. This paper comprehensively reviews the evolution, characteristics and applications of Zonal Model since it was proposed, from one dimensional model to three dimensional model and from steady state model to transient state model. In addition, the coupling approach of Zonal Model with other building application models has been more stable, such as building energy consumption models and pollutant transportation models. Although inverse calculation has been widely investigated using CFD and nodal model, the application of Zonal Model still deserve much more attention.

Key words: Zonal Model; building thermal environment; application; evolution

0 引言

日益增长的城市化和经济水平提高了人们对于生活质量的要求,也拓展了公共建筑的功能性,除了满足审美及社交需求,还需要兼顾人们的舒适性要求。因此对建筑物进行准确的气流运动以及温度分布模拟,来预估建筑的能源消耗水平,达成建筑房间的最优节能方案是十分有必要的。

自 1974 年 Nielsen 应用计算流体力学(CFD)预测了室内的气流动向,CFD 这一技术更加广泛地应用于室内环境各参数的预测^[1]。与实验方法相比,

CFD 不仅利用计算机数值模拟展现了灵活性和细节,还具有成本上的优势。此外,节点法作为一种能够快速计算的方法,将一整个建筑或者一个房间视为一个节点,所以不难看出计算简单的代价是降低了模拟的准确度,因此这一方法基本只有在快速对系统进行选型或研究整个建筑物的能源时才会使用^[2]。因此,对精确性和耗时的共同需求推动了 Zonal Model 的发展。

Zonal Model 是一种介于节点法和 CFD 之间的建模方法,最初在 70 年代被 Lebrun 提出时^[3],是作为一种中和了两者的精度的中间模型而被熟知。传

作者简介: 刘乃维(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向:建筑能耗模拟。

通信作者: 林尧林(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向:可持续建筑,建筑节能。Email:yaolinlin@gmail.com。

收稿日期: 2023-10-10

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

统的 Zonal Model 将房间划分为一个个相同的区域,并假定每个区域的空气是均匀的。在列写每个区域的方程时不考虑动量守恒,利用幂律方程连接流量和压力之间的函数关系^[4]。因此在这些假设和近似的前提下,Zonal Model 保留了精度也减少了耗时,使得能够用最少的时间较为精确地反映室内环境地温度和风速情况^[5]。正因为这些优势,Zonal Model 更广泛地应用于单房间的气流、温度以及压力预测,下文将综述近些年来 Zonal Model 的发展和应用,并提出展望。

本文对 Teshome 等学者^[6]、Megri 等学者^[7]及 Lu 等学者^[2]没有涉及的内容进行了补充,包括补充了 2020~2023 年新发表文章,将建筑物的范围扩大、不仅限于大空间建筑,对基本建筑热环境的动态、长期的数值分析进行了总结。首先,从一维、二维、三维的角度对近 30 年来建筑室内环境 Zonal Model 模拟进行了综述。然后,讨论了这种 Zonal Model 的发展和成就,并且提出了一些潜在应用,最后对这类探讨内容进行了总结。

1 Zonal Model 研究进展

1.1 一维模型

1970 年,Lebrun 提出了简单 Zonal Model 这一概念^[3],并在实测数据的基础上建立了能够测量特定情况的简单 Zonal Model。一维模型在水平的方向温度均匀,区域中的压力线性变化,即在分区时忽略了水平方向的空气流速,只考虑在垂直方向上的网格划分。

Togari 等学者^[8]在 90 年代提出了一种针对于无热源的大空间简化模型 Block,通过估计传热因子 C_a 预测垂直方向的温度分布。但 C_a 的值难以估计,因此 Chen 等学者^[9]提出了能模拟有内部热源空间的 Gebhart-Block 模型,在热平衡方程中加入了各个面之间的 Gebhart 吸收系数。这 2 种模型都忽略了室内的水平流,只在垂直方向进行分区,这也导致了与实际情况部分偏差的存在^[10]。

在 Block 之后的一维 Zonal Model 模型仍建立在一定的假设上,目前利用一维模型模拟了散热器以及电炉等热源传热情况。例如 Singh 等学者^[11]对开放容积式空气接收器(OVAR)建立了一个一维的非稳态传热模型,经过验证,当热源存在于房间中心时,模型能够很好地反映真实情况;而置于壁面附近时,就会打破等温壁面这一假设。此后 Georges 等学者^[12]以电炉为例提出了一种自动划分

热源附近壁面的方法,大大提高了温度预测的准确性。

综上所述,一维 Zonal Model 能够在实际应用过程中快速估计房间的温度分布,同样在 IDA ICE 等商业软件中,Georges 等学者^[12]也验证了其气流处理结果的准确性。

1.2 二维模型

一维模型无法反映水平方向的气流温度分布,并且对边界条件的界定非常模糊,因此推动了二维 Zonal Model 的发展。常见的二维 Zonal Model 是将一个房间细分成若干个单元,用离散方程式 T 和 P 表示每个单元之间的关联,推导出质量和动量方程。

1985 年,Howarth^[13]模拟了放置大型散热器的房间,另外在对房间的混合对流模拟中^[14],虽然对温度模拟的偏差远小于气流速度的偏差,但在接近地面和天花板的区域误差达到 10% 以上^[15]。1989 年,Fauconnier 等学者^[16]提出幂律模型(PLM),是基于伯努利方程对室内非射流气流的气流速率进行表述并入了流量系数 C_d ,方程如下:

$$\dot{m}_{j \rightarrow i} = \rho_{j,i} A \cdot C_d (P_j - P_i)^n \quad (1)$$

其中, $\dot{m}_{j \rightarrow i}$ 表示分区 j 进入分区 i 的质量流率,单位为 kg/s ; $\rho_{j,i}$ 表示分区 i 与分区 j 之间空气密度的平均值,单位为 kg/m^3 ; n 表示流动指数; P_j 、 P_i 分别表示 2 个分区的压力,单位为 Pa ; A 表示区界面的面积,单位为 m^2 。

流量系数 C_d 的具体数值,经典幂律法中定义为一个在 0.83 左右^[15]的常数,有些文章中也常使用实验中所测试出来的实际数值^[17]。表 1 比较了二维模型和其他一维、三维模型之间的流量系数,可以看出区域的维度变化与 C_d 没有关系,并且 Daoud 等学者^[18]的实验已经证实流量系数的大小(即使提高至 6 000)对室内气流没有影响。在幂律法的基础上,基于速度传播方法(VPM)的动态紧密型区域模型^[19]、二维 VEPZO 模型^[20]即非等温气流模型(VELOCITY PROPAGATING ZONAL)以及 POMA 模型^[21]都属于二维 Zonal Model。Fang 等学者^[22]在 POMA 模型的基础上将质量和能量守恒方程视为非等温方程,提高了模型的精度。另外,还有连续性方程的补充^[23],在连续循环模型中引入兼容性状态,先计算区域间空气质量流量与连接状态之间的逆表达式,再构建系统方程。

表 1 二维三维模型流量系数对比			
Table 1 Comparison of flow coefficients of 2D and 3D models			
	作者	年份	流量系数 C_d
二维	Wurtz 等学者 ^[15]	1999	0.83
	Huang 等学者 ^[24]	2005	0.83
	Inard 等学者 ^[17]	1996	0.80
三维	Lin 等学者 ^[25]	2008	垂直方向 0.83 水平方向 1.00
	Norrefeldt 等学者 ^[20]	2012	0.83
	Inard 等学者 ^[26]	1998	0.75
	Boukhris 等学者 ^[27]	2009	0.64(门口 0.37)

1.3 三维模型

前文提到了幂律模型 (PLM), 后续的许多模型都是基于此进行的模型拓展。以幂律模型为基础的模型包括 Huang 等学者^[24] 提出的 IZM (Integrated Zonal Model), Haghghat 等学者^[5] 提出的 POMA (Pressurized zOnal Model with Air-diffuser) 模型等。Megri 等学者^[28] 对 POMA 进行了改进, 提出了 POMA⁺, 采用了 3 个方向的速度项代入能量方程中。改进后模型从温度一阶精度提高至二阶精度, 并用 SCE-UA 方法校准模型的准确性。而单纯根据幂律模型来模拟气流模式, 在计算压力时会得到错误的压力值 2 MPa^[18], 因此不以幂律方程为基础的 Zonal Model、例如速度传播模型 (VELOCITY Propagating ZOnal, VEPZO)^[20], 没有使用幂律方程以及射流方程, 而是引入了气流路径长度以及特征速度矢量, 实现包括特殊气流在内的质量守恒和焓守恒。21 世纪初, Griffith 等学者^[29] 建立了基于三维欧拉方程的动量 Zonal Model, 就是将能量、质量守恒方程与无粘流的欧拉方程联系在一起, 但对于房间下侧以及空气浮力方面仍然都有一定的误差。Mucha 等学者^[30] 开发了针对室内热应力对人体的影响的三维模型, 在 2 个空气区域间考虑了内部粘性力。

由上文一维到三维 Zonal Model 的发展可以看到几乎所有 Zonal Model 的实验场合都在单个房间内, 这也意味着没有把模型拓展到整个具有多房间的建筑中。

1.4 混合模型

Lin 等学者^[25] 提出的空气流动模型 (3D-TAF) 是基于二维质量流量方程以及三维能量平衡方程的气流模型和热模型, 并应用于外部被圆形穹顶覆盖的房间, 验证穹顶的应用能够减少建筑能耗。Yu 等学者^[31] 在 2014 年提出了一种新的一维二维的混合模型、即使用动量方程的加压区域模型 (POMME),

将简化的一维动量方程代替了幂律模型。一维动量方程如下所示:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial P}{\partial x}$$

(2)

其中, u 表示 2 个分区之间的速度, 单位为 m/s; ρ 表示流体密度, 单位为 kg/m³。

幂律模型的计算方法如下:

$$u = k(\Delta P)^n$$

(3)

其中, ΔP 表示 2 个分区之间的压力差, 单位为 Pa; n 表示流动指数。

不考虑空气流动中的粘性力, 质量和能量守恒方程仍保持二维状态, 压差和速度之间的动量关系见式(2)、式(3)。

同样使用动量方程的模型 POMA⁺^[28] 是对 POMA 进行改进后, 采用了 3 个方向的速度项代入能量方程中, 因此是三维能量方程与二维质量、动量方程的混合。上述模型是在常见 Zonal Model 基础上增加了动量守恒方程, 能够兼顾全面性和准确性。

2 Zonal Model 的应用

2.1 与其他模型的耦合

Zonal Model 自 1970 年以来不仅仅局限于建筑领域, 在室内环境的研究进程中, Zonal Model 与其他模型的耦合能够扩大对于室内环境指标的检测, 不局限于温度和风速预测。但传统的建筑能耗模拟往往忽略了详细的气流运动和非均匀热环境对负荷计算的影响^[25]。另一方面, 将这些模型耦合起来进行长期动态模拟, 从而优化具有复杂热环境和分层空调的大空间建筑的设计已成为一种趋势。

表 2 具体展示了 Zonal Model 发展以来与不同模型的耦合应用, 包括商业软件、控制模型及其他气流模型。Yu 等学者^[32] 及 Fang 等学者^[22] 是分别将 POMA 与多房间热模型、地板送风计算程序进行耦合, 拓展了在机械系统建筑、混合地板送风系统中的气流模拟需求。Song 等学者^[19] 将基于速度传播方法 (VPM) 的 Zonal Model 与 PID 耦合在一起, 用于实时监测分析单一、封闭的冷通道数据中心的流量和温度。

此外, 表 2 中显示的更多的一类应用是利用模型耦合拓展环境参数, 与污染物质量平衡方程^[24]、热舒适模型^[27] 耦合, 预测温度分层现象、污染物的分布及舒适度指标。Zilio 等学者^[33] 在修改污染源模型的基础上与 Zonal Model 进行结合, 预估 COVID-19 的空气传播感染风险。另外一些特殊的环境中、例如地下

变电站^[34]以及溜冰场^[35],需要额外检测湿度、辐射等环境参数,而利用模型耦合能够大大节约时间,也使得 Zonal Model 的应用更加灵活。Liang 等学者也提

到后续会将 Zonal Model 与能源模型耦合起来进行太阳辐射、表面能量平衡、人为热源的模拟^[36],这对于城市建筑群的能耗研究有一定的帮助。

表 2 Zonal Model 的耦合应用
Table 2 Coupling and application of Zonal Model

耦合	应用
Zonal Model、三维空气喷射模型、建筑材料 VOC 排放/沉降模型	预测温度分层现象及污染物分布 ^[18]
VPM 模型、PID 控制	预测冷通道数据中心流量和温度 ^[19]
Zonal Model、热舒适模型	地中海地区非条件多房间建筑瞬态环境 ^[27]
VEPZO 模型、人体生理反应模型	室内热应激风险 ^[30]
人体动态热舒适 TPMV/TPPD 模型	风险评估模型 ^[30]
POMA、地板送风系统(UFAD)计算机程序	拓展混合地板送风系统(UFAD)应用 ^[33]
Wells-Riley 模型	人体感染风险评估 ^[33]
幂律模型、辐射模型	地下变电站的通风 ^[34]
幂律模型、辐射模型、湿度模型	溜冰场的制冷负荷应用 ^[35]
Zonal Model、人体模型	气流、温度和污染物浓度 ^[36]
Zonal Model、城市街道峡谷气温气流模拟	预测高密度城市气温 ^[36]
VEPZO 模型、TRNSYS	气流、气温快速计算 ^[37]
幂律模型、信封模型	太阳下玻璃空间的热与通风 ^[38]

尽管 Zonal Model 已经有许多方面的应用,但目前综合方法并不实用,尤其是在动态、长期的设计环境中。相应的耦合方案和计算机程序也需要进一步研究其稳定性、速度和收敛性。

2.2 空调负荷及能耗计算

一维 Zonal Model Block 模型对建筑能耗的计算比较单一,是利用模拟室内温度与室外温度的差值计算空间冷负荷^[8],对于难以计算负荷的建筑可以采用缩尺模型^[39]计算。对于低侧壁送风的大空间建筑,Huang 等学者^[40]利用 Block-Gebhart 模型计算稳态分层空调负荷,弥补了传统计算过程中只考虑了空调区域冷负荷的缺陷。模拟结果表明与假设空气充分混合、即传统的模型相比,减少了 25%的系统流量。

除了 Block 模型外,二维以及三维 Zonal Model 用于负荷模拟的情况更加多见,这里主要综述的是 Zonal Model 在动态建筑负荷中的应用。基于将空气模型中的传热系数和有效空气温度传递给负荷模型的结论^[41],Griffith 等学者^[42]将 Zonal Model 与建筑能耗模拟程序之间进行了直接和间接耦合,并验证了开放式办公室一整天的动态冷负荷。其模拟过程中的时间步长为 1.33 h,直接耦合所得出的冷负荷会比间接耦合增加 10%。Daoud 等学者^[43]对溜冰场的瞬态热行为和制冷负荷在 13 个月内进行模拟建模,以 0.5 h 为时间步长。Lin 等学者^[25]利用

三维空气流动模型(3D-TAF)模拟具有大型穹顶房屋的逐时热负荷,在一年中穹顶使用会减少 62.6%的热负荷。Kübler 等学者^[37]及 Bat 等学者^[44]实现了三维 Zonal Model 与 TRNSYS 的耦合来模拟中庭区域,减少了约 48%的供暖能源需求。同样压力 Zonal Model^[45]和 ZAER^[46]也证明利用 Zonal Model 在负荷能量计算程序中模拟瞬态温度和气流是可行的。AutoBPS 是新提出的城市建筑能源工具^[47],根据 Ruby 语言开发并依赖于 OpenStudio 和 EnergyPlus,符合当下的能源改造和屋顶光伏需求。

这些都是三维 Zonal Model 计算负荷的例子,具体应用于能耗计算的 Zonal Model 及其模型特征见表 3。

由表 3 可以看出来有的对于负荷的计算并没有将 Zonal Model 应用于房间或者建筑中,而是将 Zonal Model 与能耗模型相耦合,这也是后续研究的一个拓展点。

2.3 商业软件中的应用

权重因子法和热平衡法是近几十年来用于建筑负荷计算的 2 种主要方法^[50],早期利用权重因子法的能耗模拟软件,例如 Post Office Program^[51]、DOE-1^[52]等,但由于把空气与内部围护结构的对流系数简单地视作常数,因此在近 30 年中大部分的能耗模拟都采用热平衡法,Zonal Model 也是在此基础上拓展了其在商业软件中的应用领域。

表 3 应用于能耗计算的 Zonal Model

Table 3 Zonal Model applied to energy consumption calculation

研究者	方法	特征		
		维度	模式	步长/h
Lin 等学者 ^[25]	three-dimensional thermal and airflow (3D-TAF) model	三维	瞬态	1.00
Kühler 等学者 ^[37]	VEPZO 与 TRNSYS 耦合	三维	瞬态	
Huang 等学者 ^[40]	传统负荷加辐射换热负荷、对流换热负荷	一维	稳态/瞬态	1.00
Griffith 等学者 ^[42]	利用代码结合空气模型与建筑负荷计算	三维	稳态/瞬态	1.33
Daoud ^[43]	建筑能耗模拟程序	三维	瞬态	0.50
Wurtz 等学者 ^[45]	Sim_Zonal 模型	二维模型三维网格应用	稳态	
Backer 等学者 ^[48]	thermal Zonal Model 与 TRNSYS 耦合	二维	非稳态	24.00
Wurtz 等学者 ^[49]	Sim_Zonal 模型	二维模型三维网格应用	瞬态	1.00

对于建筑静态模拟软件,劳伦斯伯克利国家实验室开发了一个模拟界面 BCVTB (Building Control Virtual Test Bed)^[53]。除此之外,大部分的软件研究了建筑的瞬态情况。ESP-r^[54]是大型集成建筑热环境模拟软件,能够得到年冷、热负荷及供热、冷负荷峰值^[55],经过了包括 CIBSE 在内的一系列模拟验证^[56],具有较高的精确度。但是其使用率却非常低,其原因之一是操作时的难度较高,需要专业的人员进行模拟。此后 Clarke 等学者^[57]提出将 ESP-r 与 CFD 进行耦合,Beausoleil-morrison 等学者^[58]将 ESP-r 和 TRNSYS 进行耦合,并且在建筑能源建模系统中实现。而 IDA ICE^[59]则是不需要非常专业的经验和知识的一维 Zonal Model,并且已经在实际具有自然对流

以及置换通风的建筑中验证了模型的有效性和稳定性^[11]。Backer 等学者^[48]将 Zonal Model 连接到 BES 软件中,实际上是将 Togari 等学者^[8]提出的 Zonal Model 与 BES-software TRNSYS 进行了耦合。Wurtz 等学者^[45]设计的 Sim-Zonal 软件应用于法国的一家电力公司中,并将模型的动态模拟结果与 CFD 模拟结果进行了对比^[49],在平均温度上的差异小于 0.2℃,但其压力模型中的流量系数是随着压差变化而修正的,因此仍然需要更加精确的研究。综合上述软件, Johari 等学者^[60]对 IDA ICE、TRNSYS 和 EnergyPlus 进行了评估,相同精度的结果 EnergyPlus 的模拟时间更短,但其低估了热需求,而 IDA ICE 高估了热需求,但两者相对差异不超过±5%。将以上软件及其特征总结成表 4。

表 4 Zonal Model 在商业软件中的应用

Table 4 Application of Zonal Model in commercial software

时间	研究者/公司	软件/程序名称	维度	模式
1977~1993	University of Strathclyde Energy Systems Research Unit ^[54]	ESP-r	二维/三维	稳态/瞬态
1993	Togari 等学者 ^[8]	Zonal Model、BES-software TRNSYS 耦合	二维	瞬态
2001	Wurtz 等学者 ^[45]	Sim-Zonal	二维模型 三维网格应用	瞬态
2003	Wurtz 等学者 ^[49]	Sim-Zonal	二维模型 三维网格应用	瞬态
2012	Lawrence Berkeley National Laboratory ^[53]	Building Control Virtual Test Bed (BCVTB)		稳态
2012	EQUA ^[59]	IDA ICE	一维	瞬态
2014	Backer 等学者 ^[48]	Zonal Model 耦合 BES	二维模型 三维网格应用	瞬态
2013	Beausoleil-Morrison 等学者 ^[58]	ESP-r、TRNSYS 耦合	二维/三维	稳态/瞬态

考虑到商业软件中为了节省模拟时间尽快得出所需结果,使得 Zonal Model 的应用很少会采用三维模型,其中以二维模型最为多见。在实际应用中, Zonal Model 的动态模拟结果是大势所趋,因此很少会局限于稳态计算。

2.4 控制系统的应用

控制系统应用的最终目的是节省能耗,而 PID 控制系统的功能是根据动态环境中的参数来控制源头设备,从而达到节约能源的效果。这也表明对一个动态系统来说,寻找到能够实现最佳环境控制的分区模式是很有必要的。

在大部分的控制系统应用中,Zonal Model 的使用都是为了替换 CFD 的模拟效果,例如 Song 等学者^[19]在热控制系统中将速度传播分区模型与 PID 控制器进行结合,同时使用人工神经网络优化程序进行优化^[61],能够同步预测热控制系统中的空间质量流和温度大小。结果显示这种方法可以处理多个变量、包括不易测量的区域,这提高了计算能力和效率,并且误差仅在 10% 左右。

在供暖系统控制中,正确的 Zonal Model 的应用能够减少系统的负荷。李连众^[62]通过 PID 设定室外温度发生变化时的供水温度值和流量,能够减少 10% 以上的负荷。包括 Tashtoush 等学者^[63]对布置有空气处理机组以及空调房间的模拟,此外,Zampetti 等学者^[64]利用了新型的加热控制系统 PID-PMV,并且根据实验结果,这一新型的控制方法会节约 17.1% 的能耗,也能够长期使用。

在控制模型的动态过程中,Zonal Model 的应用除了温湿度控制、减少系统负荷外,同时能提高精度和缩短时间^[56],但是总体来说 Zonal Model 在室内环境的应用比较少。

3 结束语

本文回顾了 Zonal Model 的发展过程,按照不同角度进行了分类,包括这些模型在建筑环境中的开发和应用研究。实际生活中的建筑物的环境具有复杂的影响因素和跨度结构,Zonal Model 可以粗略快速地估计大空间内的气流和温度分布。

Zonal Model 建模方法在建筑模拟中的应用仍停留在理论研究阶段,对于希望追求更高计算精度、获得更丰富的建筑参数结果的实际情况来说,这些先进的建筑仿真模型的广泛应用还有很长的路要走。

Zonal Model 与建筑能耗模型以及其他评估模

型相结合具有广阔的应用前景,尤其适用于建筑的动态、长期分析。因此,需要研发出一个更成熟和实用的商业程序或软件是非常有必要的。此外,还应进一步发展 Zonal Model 的耦合模型,同时要将稳定性、速度和收敛性考虑在内。

参考文献

- [1] ZHANG Z, ZHANG Wei, ZHANG Zhao, et al. Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 1—Summary of prevalent turbulence models [J]. HVAC & R Research, 2007, 13(6): 853–870.
- [2] LU Y, DONG J, LIU J. Zonal modelling for thermal and energy performance of large space buildings: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 133: 110241.
- [3] SUN Qianli, WANG Sumin, ZHOU Jie, et al. Sediment geochemistry of Lake DaiDai, north-central China: Implications for catchment weathering and climate change during the Holocene [J]. Journal of Paleolimnology, 2010, 43: 75–87.
- [4] RIEDERER P, MARCHIO D, VISIER J C. Room thermal modeling adapted to the test of HVAC control systems [J]. Building and Environment, 2002, 37(8–9): 777–790.
- [5] HAGHIGHAT F L Y, MEGRI A C. Development and validation of a zonal model—POMA [J]. Building and Environment, 2001, 36(9): 1039–1047.
- [6] TESHOME E J, F. HAGHIGHAT F. Zonal models for indoor air flow – A critical review [J]. International Journal of Ventilation, 2016, 3(2): 119–129.
- [7] MEGRI A C, HAGHIGHAT F. Zonal modeling for simulating indoor environment of buildings: Review, recent developments, and applications [J]. HVAC & R Research, 2007, 13(6): 887–905.
- [8] TOGARI S A Y, MIURA K. A simplified model for predicting vertical temperature distribution in a large space [J]. ASHRAE Transactions, 1993, 99: 84–99.
- [9] CHEN Huang, SONG Yan, LUO Xing. Application of the Gebhart-Block model for predicting vertical temperature distribution in a large space building with natural ventilation [C]// Proceedings of the Sixth International Conference for Enhanced Building Operations. Shenzhen, China: Thermal Power Branch of Chinese Architectural Society, 2006: 1–4.
- [10] WANG Haidong, ZHOU Pengzhi, GUO Chunsheng, et al. On the calculation of heat migration in thermally stratified environment of large space building with sidewall nozzle air-supply [J]. Building and Environment, 2019, 147: 221–230.
- [11] SINGH G P, SHEKHAR R, CHANDRA L, et al. One-dimensional zonal model for the unsteady heat transfer analysis in an open volumetric air receiver [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2021, 13(1): 011011.
- [12] GEORGES L, THALFELDT M, SKREIBERG O, et al. Validation of a transient zonal model to predict the detailed indoor thermal environment: Case of electric radiators and wood stoves [J]. Building and Environment, 2019, 149: 169–181.
- [13] HOWARTH A T. The prediction of air temperature variations in naturally ventilated rooms with convective heating [J]. Building

- Services Engineering Research and Technology, 1985, 6(4): 169–175.
- [14] MUSY M W E, WINKELMANN F, et al. Generation of a zonal model to simulate natural convection in a room with a radiative/convective heater [J]. *Building and Environment*, 2001, 36(5): 589–596.
- [15] WURTZ E N J M, WINKELMANN F. Two – and three – dimensional natural and mixed convection [Z]. Berkeley, USA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- [16] FAUCONNIER R G A, GUILLEMARD P. Eléments d'analyse du régime dynamique en thermique du bâtiment [Z]. St-Remy-Les-Chevreuse: CEBTP, 1989.
- [17] INARD C B H, DALICIEUX P. Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model [J]. *Energy and Buildings*, 1996, 24(2): 125–132.
- [18] DAOUD A, GALANIS N. Prediction of airflow patterns in a ventilated enclosure with zonal methods [J]. *Applied Energy*, 2008, 85(6): 439–448.
- [19] SONG Zhihang, MURRAY B T, SAMMAKIA B. A dynamic compact thermal model for data center analysis and control using the zonal method and artificial neural networks [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(1): 48–57.
- [20] NORREFELDT V, GRÜN G, SEDLBAUER K. VEPZO – Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space [J]. *Building and Environment*, 2012, 48: 183–194.
- [21] LIN Yi. POMA: A zonal model for airflow and temperature distribution analysis [D]. Ann Arbor, USA: Concordia University, 1999.
- [22] FANG Hong, ZHAO Dongliang, TAN Gang, et al. Study of underfloor air distribution using zonal model-based simulation and experimental measurements [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 152: 96–107.
- [23] AXLEY J W. Zonal models using loop equations and surface [J]. *Air Distribution in Rooms; Ventilation for Health and Sustainable Environment*, 2000, 1: 235–240.
- [24] HUANG H H F, LEE C S. An integrated zonal model for predicting indoor airflow, temperature, and VOC distributions [J]. *ASHRAE Transactions*, 2005, 111(1): 601–611.
- [25] LIN Yaolin, ZMEUREANU R. Three-dimensional thermal and airflow (3D-TAF) model of a dome-covered house in Canada [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(1): 22–34.
- [26] INARD C M A, DEPECKER P. Energy consumption and thermal comfort in dwelling – cells: A zonal – model approach [J]. *Building and environment*, 1998, 33(5): 279–291.
- [27] BOUKHRIS Y, GHARBI L, GHRAB-MORCOS N. Modeling coupled heat transfer and air flow in a partitioned building with a zonal model: Application to the winter thermal comfort [J]. *Building Simulation*, 2009, 2(1): 67–74.
- [28] MEGRI A C, YU Y. New calibrated zonal model (POMA+) for temperature and airflow predictions [J]. *Building and Environment*, 2015, 94: 109–121.
- [29] GRIFFITH B, CHEN Q Y. A momentum – zonal model for predicting zone airflow and temperature distributions to enhance building load and energy simulations [J]. *HVAC & R Research*, 2003, 9(3): 309–325.
- [30] MUCHA K N G C, NYTSCH-GEUSEN C, WÖLKI D, et al. A zonal room model in combined simulation with a physiological human response model to quantify indoor heat stress risks [C]// 14th International Conference of IBPSA. Hyderabad, India: IBPSA, 2015: 442–448.
- [31] YU Yao, MEGRI A C. A novel pressurized zonal model using the momentum equation [J]. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, 7(1): 77–87.
- [32] YU Y, MEGRI C. A novel method for thermostat set point prediction for energy savings and/or better human thermal comfort – A zonal modelling approach [J]. *International Journal of Ventilation*, 2016, 13(3): 299–318.
- [33] ZILIO C, MARIGO M, TOGNON G, et al. A zonal model for assessing the infection risk distribution of COVID – 19 in indoor environments [J]. *E3S Web of Conferences*, 2022, 343: 15.
- [34] BEIZA M, RAMOS J C, RIVAS A, et al. Zonal thermal model of the ventilation of underground transformer substations: Development and parametric study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(1): 215–228.
- [35] DAOUD A, GALANIS N, BELLACHE O. Calculation of refrigeration loads by convection, radiation and condensation in ice rinks using a transient 3D zonal model [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(14–15): 1782–1790.
- [36] REN Zhengeng, STEWART J. Prediction of personal exposure to contaminant sources in industrial buildings using a sub – zonal model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(5): 623–638.
- [37] KÜBLER S, NORREFELDT V. Enhancement of the building simulation software TRNSYS by coupling to the VEPZO model programmed in Modelica [C]// Proceedings of the 10th International Modelica Conference. Lund, Sweden: Linköping University, 2014: 107–114.
- [38] VOELTZEL A C F R, GUARRACINO G. Thermal and ventilation modelling of large highly-glazed spaces [J]. *Energy and Buildings*, 2001, 33(2): 121–132.
- [39] RAVICHANDRAN M, GOULDIN F C. Determination of temperature and concentration profiles using (a limited number of) absorption measurement [J]. *Combustion Science and Technology*, 1986, 45(1–2): 47–64.
- [40] HUANG C, LI R, LIU Y, et al. Study of indoor thermal environment and stratified air-conditioning load with low-sidewall air supply for large space based on Block-Gebhart model [J]. *Building and Environment*, 2019, 147: 495–505.
- [41] ZHAI Zhiqiang, CHEN Qingyanyan. Solution characters of iterative coupling between energy simulation and CFD programs [J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35(5): 493–505.
- [42] GRIFFITH B, CHEN Q Y. Framework for coupling room air models to heat balance model load and energy calculations (RP – 1222) [J]. *HVAC & R Research*, 2004, 10(2): 91–111.
- [43] DAOUD A G N. Calculation of the thermal loads of an ice rink using a zonal model and building energy simulation software [J]. *ASHRAE Transactions*, 2006, 112(2): 526–538.
- [44] BAT E A M S, ROMANI Z, BOZONNET E, et al. Optimizing urban courtyard form through the coupling of outdoor zonal approach and building energy modeling [J]. *Energy*, 2023, 264: 126176.
- [45] WURTZ E D F, MUSY M. A thermal and airflow analysis tool using simplified models based on the zonal method [C]// 2001 World Conference. Napoli: Clima, 2001: 1–13.
- [46] GHARBI L, GHRAB – MORCOS N, ROUX J J. Modélisation

- des transferts thermo-aérauliques couplés dans les bâtiments non conditionnés [C]//Proceedings of the Ninth International IBPSA Conference. Toulouse, France; IBPSA, 2004; 1-4.
- [47] DENG Zhang, CHEN Yixing, YANG Jingjing, et al. AutoBPS: A tool for urban building energy modeling to support energy efficiency improvement at city-scale [J]. Energy and Buildings, 2023, 282; 112794.
- [48] BACKER D L L J, JANSSENS A. The use of a zonal model to calculate the stratification in a large building [C]// 35th AIVC Conference: Ventilation and Airtightness in Transforming the Building Stock to High Performance AIVC. Poznań, Poland; AIVC, 2014; 522-531.
- [49] WURTZ E D F, MORA L, et al. SIM-ZONAL: A software to evaluate the risk of discomfort; coupling with an energy engine, comparison with CFD codes and experimental measurements [C]//Proceedings of the Eighth International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands; IBPSA, 2003, 3; 1423-1428.
- [50] GB T. Incorporating nodal and zonal room air models into building energy calculation procedures [Z]. Cambridge, MA; Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [51] METIN L, HENNIGNER R H, SHIH J Y, et al. Computer program for analysis of energy utilization in postal facilities [Z]. Illinois; General American Transportation Corporation, 1971.
- [52] DIAMOND S C H B D, MCDONALD T E. DOE-1 verification program plan [R]. Los Alamos, NM; Los Alamos National Lab (LANL), 1978.
- [53] WETTER M N T. Building controls virtual test bed user manual [R]. Berkeley, CA; Lawrence Berkley National Laboratory, 2012.
- [54] STRACHAN P. ESP-R; Summary of validation studies [R]. Glasgow, UK; University of Strathclyde, 2000.
- [55] STRACHAN P K G, MACDONALD I. Encapsulation of validation tests in the ESP-R simulation program [C]// IBPSA Building Simulation '05. Montreal, Canada; IBPSA, 2005; 1-8.
- [56] STRACHAN P A, KOKOGIANNAKIS G, MACDONALD I A. History and development of validation with the ESP-R simulation program [J]. Building and Environment, 2008, 43(4); 601-609.
- [57] CLARKE J A D W M, NEGRAO C. The implementation of a computational fluid dynamics algorithm within the ESP-R system [C]//Proceedings of Building Simulation'95. Wisconsin, USA; IBPSA, 1995; 166-175.
- [58] BEAUSOLEIL-MORRISON I, MACDONALD F, KUMMERT M, et al. Co-simulation between ESP-R and TRNSYS [J]. Journal of Building Performance Simulation, 2013, 7(2); 133-151.
- [59] ERIKSSON L G G, GROZMAN Z, GROZMAN P, et al. CFD-free, efficient, micro indoor climate prediction in buildings [M]//COOK M, WRIGHT J, MOURSHED M, et al. Building Simulation and Optimization, BSO12. Loughborough, UK; Loughborough University, 2012, 12; 1-8.
- [60] JOHARI F, MUNKHAMMAR J, SHADRAM F, et al. Evaluation of simplified building energy models for urban-scale energy analysis of buildings [J]. Building and Environment, 2022, 211; 108684.
- [61] SONG Zhihang, MURRAY B T, SAMMAKIA B. Airflow and temperature distribution optimization in data centers using artificial neural networks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64; 80-90.
- [62] 李连众. 基于 Zonal_Model 信息的单体建筑热水供暖系统控制策略仿真 [J]. 建筑科学, 2012, 28(2); 88-94.
- [63] TASHTOUSH B, MOLHIM M, AL-ROUSAN M. Dynamic model of an HVAC system for control analysis [J]. Energy, 2005, 30(10); 1729-1745.
- [64] ZAMPETTI L, ARNESANO M, REVEL G M. Experimental testing of a system for the energy-efficient sub-zonal heating management in indoor environments based on PMV [J]. Energy and Buildings, 2018, 166; 229-238.